

Оценка коэффициента готовности орбитальной группировки

© И.В. Матвеев, С.П. Вовченко

АО «ИСС», г. Железнодорожск Красноярского края, 662972, Россия

Исходя из состава космического комплекса, могут быть заданы показатели надежности, например коэффициент готовности орбитальной группировки. Данный показатель следует рассчитывать и подтверждать на различных этапах жизненного цикла. Необходимо также оценивать наиболее целесообразный способ выполнения орбитальной группировки. Коэффициент готовности орбитальной группировки учитывает коэффициент готовности космического аппарата и коэффициент готовности наземного комплекса управления, который непосредственно работает с космическими аппаратами из состава орбитальной группировки. Исследования подтвердили, что интенсивность выполнения орбитальной группировки целесообразно оценивать марковскими методами.

Ключевые слова: космический комплекс, космический аппарат, орбитальная группировка, коэффициент готовности, время перерыва, время выполнения.

Введение. В состав космического комплекса (КК) могут включать несколько однотипных космических аппаратов (КА), а также орбитальную группировку (ОГ). В зависимости от состава КК, могут быть заданы показатели надежности, например коэффициент готовности орбитальной группировки. Данный показатель необходимо рассчитывать и подтверждать в соответствии с требованиями ГОСТ РО 1410-001–2009, ГОСТ Р 27.001–2009, на различных этапах жизненного цикла. Также следует оценить наиболее целесообразный способ выполнения орбитальной группировки согласно требованиям технического задания (ТЗ).

Коэффициент готовности орбитальной группировки ($K_{\Gamma}^{\text{ОГ}}$) — это вероятность того, что орбитальная группировка окажется работоспособной в произвольный момент времени.

Под отказом ОГ понимают снижение числа работоспособных КА в орбитальной группировке ниже нормативного значения.

Показатели надежности $K_{\Gamma}^{\text{КА}}$ и $K_{\Gamma}^{\text{ОГ}}$ связаны между собой выражением

$$K_{\Gamma}^{\text{ОГ}} = (K_{\Gamma}^{\text{КА}})^n K_{\Gamma}^{\text{НКУ}}, \quad (1)$$

где $K_{\Gamma}^{\text{ОГ}}$ — коэффициент готовности ОГ при работе всех n космических аппаратов орбитальной группировки; $K_{\Gamma}^{\text{КА}}$ — коэффициент готовности единичного КА; n — число аппаратов в орбитальной группировке.

ке; K_{Γ}^{HKY} — коэффициент готовности наземного комплекса управления (HKY) при условии общего HKY для всех КА в ОГ.

Оценка коэффициента готовности КА. Коэффициент готовности КА — вероятность того, что КА окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение КА по целевому назначению не предусматривается.

Согласно ГОСТ 27.003–90, показатель $K_{\Gamma}^{\text{КА}}$ характеризует надежность КА (канал связи, ретрансляции) как восстанавливаемого изделия в пределах и за пределами срока активного существования (САС) — до наступления окончательного отказа — и является комплексным показателем надежности, характеризующим количественно два основных свойства надежности: безотказность и ремонтнопригодность (восстановление работоспособного состояния).

Можно предположить, что у КА только одно работоспособное (номинальное) состояние. Любое другое (неработоспособное) состояние может быть вызвано отказом в какой-либо бортовой системе, при этом вероятность совмещения двух и более таких отказов пренебрежимо мала.

Вероятность нахождения КА в работоспособном (номинальном) состоянии и будет определять его коэффициент готовности.

Частичные отказы в бортовых системах КА могут привести к разным по длительности перерывам в работе КА по целевому назначению, связанным с восстановлением работоспособности КА в части стволов (полезной нагрузки).

Анализ перерывов основан на опыте летной эксплуатации по предыдущим программам КА.

Ожидаемые перерывы в работе КА могут быть двух видов:

- перерывы из-за отказов резервированного оборудования, компенсируемые средствами бортовой автоматики;
- перерывы из-за отказов оборудования, компенсируемые только с применением средств HKY.

На основе характеристик перерывов и интенсивностей отказов с учетом того, что $\lambda_{1,2}^{-1} \gg T_{1,2}$, можно приближенно вычислить коэффициент готовности по выражению

$$K_{\Gamma}^{\text{КА}} = 1 - \sum_{i=1}^2 \lambda_i T_i, \quad (2)$$

где λ_i — частота одиночного отказа для соответствующего перерыва; T_i — среднее время восстановления работоспособности для соответствующего перерыва.

Оценка коэффициента готовности наземного комплекса управления. Коэффициент готовности HKY — это вероятность того, что в

произвольный момент времени НКУ окажется работоспособным. Под отказом НКУ понимают невыполнение по вине аппаратно-программных средств составных частей НКУ любой из следующих макроопераций управления КА:

- по задачам командно-программного управления — совокупность операций, обеспечивающих формирование и выдачу на КА в заданное время радиокоманд (пакетов командно-программной информации), прием от КА и обработку квитанций об исполнении (получении);

- по задачам телеметрического обеспечения — совокупность операций, обеспечивающих в заданное время прием телеметрической информации от КА, ее обработку и отображение результатов обработки требуемого качества;

- по задачам навигационно-баллистического обеспечения (НБО) — совокупность операций, обеспечивающих в заданное время прием, сбор и обработку результатов измерения текущих навигационных параметров КА, решение задач НБО по управлению полетом КА.

НКУ в целом и его каждая составная часть при определении коэффициентов готовности рассматриваются как восстанавливаемая система. Восстановление работоспособности составных частей НКУ осуществляется путем замены отказавшего устройства на устройство из комплекта запасных частей, инструментов, принадлежностей (ЗИП) с восполняемыми запасами, обеспечивающими требуемое среднее время восстановления, или путем ремонта отказавшего прибора, если аналогичный исправный прибор отсутствует в составе ЗИП.

НКУ в составе ОГ должен функционировать до завершения САС последнего КА из состава ОГ. Требуемый срок эксплуатации НКУ обеспечивается:

- за счет применения надежных программно-аппаратных средств;
- резервирования элементов НКУ;
- своевременного восполнения ЗИП.

Коэффициент готовности элемента НКУ определяется по следующей формуле:

$$K_{\Gamma i} = \frac{T_{Oi}}{T_{Oi} + T_{Bi}}, \quad (3)$$

где T_{Oi} — среднее время наработки на отказ элемента; T_{Bi} — среднее время восстановления элемента.

Математическая модель для расчета $K_{\Gamma}^{\text{НКУ}}$ может различаться в зависимости от структурной схемы надежности (ССН) НКУ. Например, коэффициент готовности для n последовательно соединенных ССН элементов определяется по формуле

$$K_{\Gamma} = \prod_{i=1}^n K_{\Gamma i}. \quad (4)$$

Для поддержания ОГ в работоспособном состоянии существует возможность ее восполнения космическими аппаратами как с Земли, так и с помощью резервных КА, находящихся на орбите. Однако иметь даже один КА в качестве орбитального резерва, как правило, экономически нецелесообразно.

Оценка интенсивности восполнения ОГ. Время восполнения орбитальной группировки с Земли зависит от следующих факторов:

- 1) наличие или отсутствие изготовленного КА;
- 2) схемы выведения КА на орбиту (с довыведением, без довыведения);
- 3) время электрических проверок при отказе;
- 4) использование различных средств выведения (РН, РБ, ГО).

Численно время восполнения ОГ в случае наличия изготовленного КА можно оценить по формуле

$$T_{\text{ВОГ}} = T_{\text{ЗИ}} + T_{\text{тр}} + T_{\text{р}} + T_{\text{выв}} + T_{\text{довыв}} + T_{\text{вв}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ЗИ}}$ — время электрических проверок на заводе-изготовителе (ЗИ); $T_{\text{тр}}$ — время транспортировки КА с ЗИ на космодром запуска; $T_{\text{р}}$ — время подготовки КА на техническом и стартовом комплексах (ТК и СК); $T_{\text{выв}}$ — время выведения КА на опорную орбиту; $T_{\text{довыв}}$ — время довыведения КА на орбиту; $T_{\text{вв}}$ — время ввода КА в эксплуатацию.

Интенсивность восполнения ОГ является обратной величиной к времени восполнения орбитальной группировки и вычисляется по формуле

$$\mu = \frac{1}{T_{\text{ВОГ}}}. \quad (6)$$

Рассмотрим случай восполнения ОГ при отсутствии изготовленного КА. Исходя из того, что среднее время изготовления и испытаний КА занимает примерно 24 мес, формула для оценки времени восполнения ОГ в случае отсутствия изготовленного КА и при прогнозируемом отказе примет вид

$$T_{\text{ВОГ1}} = T_{\text{изг}} + T_{\text{ВОГ}}, \quad (7)$$

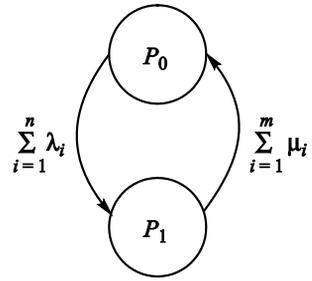
где $T_{\text{изг}}$ — время изготовления и испытаний КА на ЗИ; $T_{\text{ВОГ}}$ — время восполнения ОГ при прогнозируемом отказе.

Интенсивность восполнения ОГ при отсутствии изготовленного КА оценивается аналогично формуле (6):

$$\mu = \frac{1}{T_{\text{ВОГ1}}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{ВОГ1}}$ — время восполнения ОГ в случае отсутствия изготовленного КА.

Оценка коэффициента готовности ОГ в случае восполнения. Коэффициент готовности ОГ, состоящей из n КА, удобно рассчитать, используя метод Маркова (ГОСТ Р51901.15–2015). На рисунке представлена марковская модель ОГ с учетом следующих условий:



Марковская модель ОГ

- существует всего два состояния ОГ — работоспособное (P_0) и неработоспособное (P_1);

- отказ одного КА из состава ОГ приводит к отказу ОГ;
- все КА из состава ОГ имеют одинаковую интенсивность отказов;

- вероятность отказа НКУ не учитывать, так как время восстановления работоспособного состояния ОГ в случае отказа НКУ пренебрежимо мало по сравнению со случаем отказа КА из состава ОГ.

На основании марковской модели ОГ (см. рисунок) можно построить математическую модель для расчета коэффициента готовности ОГ:

$$\begin{cases} P_0 \sum_{i=1}^n \lambda_i - P_1 \sum_{i=1}^m \mu_i = 0; \\ P_1 \sum_{i=1}^m \mu_i - P_0 \sum_{i=1}^n \lambda_i = 0; \\ P_0 + P_1 = 1, \end{cases} \quad (9)$$

где P_0 — вероятность того, что ОГ окажется работоспособной в произвольный момент времени ($K_{ОГ}$); P_1 — вероятность того, что ОГ окажется неработоспособной в произвольный момент времени; λ_i — интенсивность отказов i -го КА из состава ОГ; μ_i — интенсивность восстановления ОГ i -м числом КА; m — число КА, вводимых одновременно в состав ОГ для возобновления ее работоспособности; n — число КА в составе ОГ.

Интенсивность восполнения ОГ μ_i определяется в соответствии с формулами (6) и (8).

Интенсивность отказов i -го КА из состава ОГ можно рассчитать по формуле

$$\lambda_i = \frac{-\ln(P_i^{КА})}{T_i^{AC}}, \quad (10)$$

где $P_i^{КА}$ — вероятность безотказной работы за САС i -го КА из состава ОГ; T_i^{AC} — САС i -го КА из состава ОГ.

Заключение. В результате расчета по приведенной методике коэффициента готовности для орбитальной группировки, состоящей из трех КА, можно сделать вывод о том, что для поддержания ОГ в работоспособном состоянии и выполнения требований ТЗ к коэффициенту готовности ОГ достаточно иметь хотя бы один изготовленный КА на заводе-изготовителе.

Статья поступила в редакцию 27.01.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Матвеев И.В., Вовченко С.П. Оценка коэффициента готовности орбитальной группировки. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1477.html> DOI 10.18698/2308-6033-2016-03-1477

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.

Матвеев Иван Владимирович родился в 1988 г., окончил СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнёва в 2011 г. Инженер отдела надежности и применения ЭРИ АО «ИСС». e-mail: matveev510@iss-reshetnev.ru

Вовченко Сергей Петрович родился в 1979 г., окончил Красноярский политехнический университет в 2002 г. Начальник группы расчета надежности АО «ИСС». e-mail: Vovchenko@iss-reshetnev.ru

Orbit group availability assessment

© I.V. Matveev, S.P. Vovchenko

JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, 662972, Russia

We examine the issues of a space complex composition and find out that it can set reliability indexes such as the orbit group availability. This factor takes into account the availabilities of the aircraft and the terrestrial control complex operating with the aircrafts in the orbit group. We find it necessary to calculate and confirm the availability at the different space complex product life stages. The research demonstrates Markov method as the most reasonable estimation method for orbit group implementation intensity.

Keywords: *space complex, aircraft, orbit group, availability function, break time, implementation time.*

Matveyev I.V. (b. 1988) graduated from Siberian State Aerospace University in 2011. Engineer of the Department of Reliability and Application of Electric and Radio products, JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems.
e-mail: matveev510@iss-reshetnev.ru

Vovchenko S.P. (b. 1979) graduated from Krasnoyarsk State Technical University in 2002. Head of reliability calculation group, JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems. e-mail: Vovchenko@iss-reshetnev.ru